

冯莉,樊燕燕,王力,等.基于模糊理论的高铁连续梁桥地震风险评估[J].地震工程学报,2020,42(3):639-645.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.639  
FENG Li,FAN Yanyan,WANG Li,et al.Seismic Risk Assessment of High-speed Railway Continuous Girder Bridges Based on Fuzzy Theory[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):639-645.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.639

## 基于模糊理论的高铁连续梁桥地震风险评估

冯 莉<sup>1</sup>, 樊燕燕<sup>1</sup>, 王 力<sup>1</sup>, 李子奇<sup>1,2</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**以某高速铁路线上一座连续梁桥为例,运用模糊综合评判法,结合基于位移的支座损伤分析和截面曲率的桥墩损伤分析,以全概率理论地震损失模型为基础,提出了基于模糊理论的桥梁系统地震经济风险评估方法。结果表明:综合考虑桥梁系统的模糊地震经济风险分析方法能更全面地计算出连续梁桥在地震作用下的经济损失,仅以桥墩构件代表全桥所得地震经济损失误差较大。基于模糊理论的一年预期损失风险框架方法通过结构抗震性能的概率特征可对高速铁路连续梁桥的地震直接经济风险进行全面评估,为该类桥梁的抗震设计、维修加固和灾后重建等方案做出合理评价。

**关键词:**地震经济风险;连续梁桥;系统易损性;模糊理论;年预期损失

中图分类号:U442.55;U448.23

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2020)03-0639-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.639

## Seismic Risk Assessment of High-speed Railway Continuous Girder Bridges Based on Fuzzy Theory

FENG Li<sup>1</sup>, FAN Yanyan<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, LI Ziqi<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** In this paper, based on fuzzy theory, we propose a seismic economic risk assessment method for bridge systems and take a high-speed railway continuous girder bridge as an example. We adopted a fuzzy comprehensive evaluation method and performed combined damage analyses of the displacement-based support and sections of a curvature-based pier. The results showed that the proposed analysis method of the fuzzy seismic economic risk for bridge systems can comprehensively and accurately calculate the economic losses of continuous girder bridges under earthquake. We found the error for the seismic economic loss to be larger when pier components are used to represent the whole bridge. This framework method for determining the annual expected risk of loss based on fuzzy theory can comprehensively assess the direct economic risk of a high-speed railway continuous girder bridge based on the probabilistic characteristics of the structural seismic performance. In addition, this method can be used to make reasonable evaluations of the seismic design, maintenance, reinforcement, and post-disaster reconstruction

收稿日期:2019-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51768037);长江学者和创新团队发展计划滚动支持资助项目(IRT15R29)

第一作者简介:冯 莉(1993-),女,硕士研究生,研究方向:桥梁地震风险研究。E-mail:625052178@qq.com。

通信作者:樊燕燕(1976-),女,副教授,硕士生导师,研究方向:桥梁地震风险评估。E-mail:12062481@qq.com。

of high-speed railway continuous girder bridges.

**Keywords:** seismic economic risk; continuous girder bridge; seismic vulnerability; fuzzy theory; annual expected loss

## 0 引言

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,是世界上地震最活跃的国家之一。“四纵四横”高速铁路网多处于高烈度区,因此高速铁路桥梁的抗震设计往往对下部结构设计起控制作用。高速铁路桥梁相对于公路、普通铁路桥梁不同之处在于<sup>[1]</sup>:(1)桥墩、支座体系刚度较大,位移限制要求高,因此要承受更大的地震荷载;(2)桥梁比例大,高架桥、长桥多;(3)行车密度大,车速快;(4)下部结构主要采用重力式桥墩,墩身截面尺寸大,桥墩配筋率低。

在桥梁抗震领域,基于性能的抗震设计理论体系已渐趋完善。21世纪初美国太平洋地震工程研究中心(PEER)提出了第二代抗震性能评估框架体系,其主要以全概率理论为基础,考虑了工程结构的非线性行为和地震事件的不确定性,并从经济性视角分析结构的抗震性能问题<sup>[2]</sup>。以全概率为基础的地震分析框架体系主要分析结构的地震易损性、工程结构所在场地的地震危险性,再综合地震损失计算方法,定量评估结构的震害损失。目前国内,研究主要聚焦于结构的地震易损性研究,而从经济性角度科学评价结构抗震性能的研究相对匮乏<sup>[3-4]</sup>,且主要集中于框架结构和重力坝等结构,而对于桥梁结构的地震经济损失的研究尚处于起步阶段。文献[5-6]均以桥墩损伤状态代表全桥损伤状态定量评估高墩大跨连续刚构桥的地震经济风险。然而,对于连续梁桥、斜拉桥等

桥型,支座在地震中的损伤不可忽略,因此仅以桥墩构件代表全桥地震易损性,精度相对较低。

本文针对以往研究的局限性,综合考虑连续梁桥各主要部件(支座、桥墩等)的受力特点,提出了一种基于模糊理论的高速铁路连续梁桥地震经济风险分析法。结果表明:基于模糊理论评估连续梁桥的地震经济风险方法机理明确、分析简便合理。以现金形式定量表达结构整体的地震经济风险,可为震后桥梁的维修加固或重建提供必要的决策依据。

## 1 桥梁地震风险评估理论

PEER提出的地震风险评估框架体系主要有4部分,分别为地震危险性分析、结构分析、损伤分析和损失分析<sup>[7]</sup>。本文结合高速铁路连续梁桥的特点,以PEER的地震风险评价方法为基础,选用年预期损失(EAL)作为经济风险评估参量。年预期损失(EAL)<sup>[8]</sup>计算如式(1)所示:

$$EAL = \iiint L_r dG(L_r | DM) dG(DM | EDP) dG(EDP | IM) dG(IM) \quad (1)$$

式中: $L_r$ 为损失比(即维修费用与重建费用之比); $DM$ 为损伤状态变量; $IM$ 为地震动强度参数; $EDP$ 为结构需求参数; $dG(x | y)$ 为 $G(x | y)$ 对 $x$ 的微分, $G(x | y) = P(x < y | y = Y)$ 为条件互补累计分布函数。分析流程如图1。

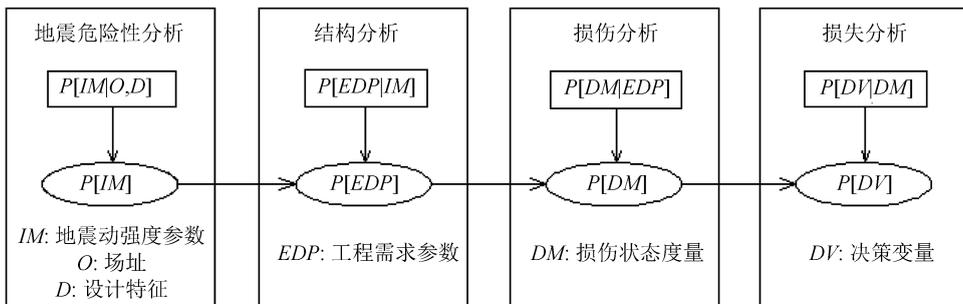


图1 分析流程图

Fig.1 Analytic flowchart

### 1.1 地震危险性

地震危险性<sup>[9]</sup>指建筑物在既定时间段内可能遭受的最大震害程度。CORNELL<sup>[10]</sup>假定震害发生时间服从泊松分布,提出了地震危险性-重现期近似公式。通过式(2)对桥梁所在场地进行地震危险性

分析,最终即可得到地震强度指标和年超越概率水平( $f_a$ )的关系曲线。

$$f_a(im) = k_0(im)^{-k_1} \quad (2)$$

式中: $f_a(im)$ 为地震 $im$ 的年超越概率; $k_0$ 和 $k_1$ 均为经验系数。

采用式(2),代入 2 个地震强度和与之对应的峰值加速度就能确定参数  $k_0$  和  $k_1$ 。规范<sup>[11]</sup>规定多遇、设计、罕遇地震的  $f_a$  分别为 0.02、0.002 1、0.000 4。对算例桥梁场地进行地震危险性计算得,  $k_0 = 5.0 \times 10^{-5}$ ,  $k_1 = 2.30$ 。最后基于上述计算即可得到桥址地震危险性曲线(图 2)。

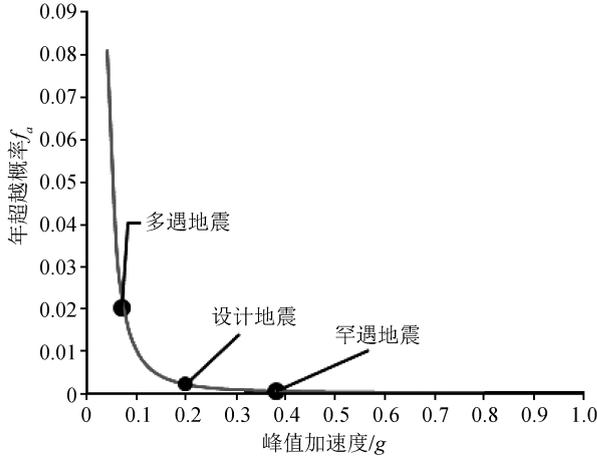


图 2 地震危险性曲线  
Fig.2 Seismic hazard curve

## 1.2 结构分析

### 1.2.1 地震易损性

桥梁结构在地震中的破坏程度属于一个模糊概念,因此,没有明显的等级划分标志。连续梁桥主要由主梁、桥墩(台)、支座等构件组成结构系统,地震作用下任何构件遭到破坏均可能影响桥梁的正常使用功能。大量震害资料表明,连续梁桥震害损伤部位主要集中于桥墩和支座构件,梁体破坏的概率通常较小。在震害损伤评估中,为简化计算,主要考虑桥墩的损伤来代表全桥的损伤水平,显然这与震后桥梁实际损伤情况不符。研究表明,桥梁系统在地震作用下的失效概率比其构件的失效概率都高<sup>[12-13]</sup>,因此,仅用部分构件的易损性来代替桥梁系统的易损性可能造成较大误差。

### 1.2.2 损伤指标

根据桥梁结构在震后的使用功能、主要构件的损伤程度及恢复运营的难易程度将桥梁震害划分为 5 个破坏等级<sup>[14]</sup>列于表 1。本文桥例中活动支座容许位移为 100 mm。以支座允许相对位移  $D$  为轻微

表 1 桥梁结构抗震性能水准

Table 1 Seismic performance level of bridge structures

性能水准	损伤状态	状态描述
DS1	基本完好	正常运营
DS2	轻微破坏	一般修复即可恢复运营
DS3	中等破坏	经抢修可恢复使用,永久性修复可恢复正常运营
DS4	严重破坏	临时加固,可恢复部分运营
DS5	完全破坏	功能丧失,不可恢复

损伤临界点,参考文献[15-16],桥梁主要构件(桥墩、支座)的损伤等级指标见表 2。

表 2 桥梁构件损伤等级指标

Table 2 Damage level indexes of bridge components

损伤状态	等级	支座损伤 $D/\text{mm}$	桥墩损伤
基本完好	DS1	$D < 100$	0.00~0.10
轻微破坏	DS2	$100 \leq D < 150$	0.10~0.25
中等破坏	DS3	$150 \leq D < 200$	0.25~0.50
严重破坏	DS4	$200 \leq D < 250$	0.50~0.90
完全破坏	DS5	$D \geq 250$	0.90~1.00

## 2 基于模糊理论的地震经济风险评估

本文借模糊数学中研究处理模糊性和综合性的方法,考虑桥墩和支座在地震中的贡献,建立桥梁系统模糊损伤经济风险评估方法。

令桥梁系统模糊损伤论域为  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ ,根据 1.2 节中对桥梁损伤状态的定义,损伤论域规定为:

$D = \{\text{基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 完全破坏}\}$

定义论域上模糊子集  $P = p_1/d_1 + p_2/d_2 + \dots + p_n/d_n$ ,其中  $p_i$  为损伤等级  $d_i$  对模糊子集  $P$  的隶属度。

$$R = \left\{ \begin{matrix} r_1 \\ \vdots \\ r_m \end{matrix} \right\} = \left[ \begin{matrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{matrix} \right]_{m \times n} \quad (3)$$

综合单因素评定结果  $r_i$ ,可得总的评定结果  $B, B = A \cdot R$ ,亦如下式所示:

$$[p_1, p_2, \dots, p_n] = [a_1, a_2, \dots, a_n] \cdot \left[ \begin{matrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{matrix} \right] \quad (4)$$

运用层次分析(AHP)法考虑因素论域中各损伤因素的重要性,取桥墩曲率延性损伤指数:支座位移延性损伤指数的模糊向量,即:权重系数  $A = \{0.85, 0.15\}$ 。

综上,基于多元模糊理论的地震经济风险评估步骤如下:

- (1) 确定模糊损伤论域和不同损伤等级;
- (2) 选取桥梁结构的损伤因素,得到与之对应的模糊向量,即各因素对应的损伤权重;
- (3) 通过有限元软件得到结构体系响应,确定出各损伤因素值;
- (4) 计算得到各状态隶属度组成的模糊关系矩阵  $R$ ;
- (5) 求解模糊损伤向量  $B = A \cdot R$ ;
- (6) 计算结构综合损伤指数,并由其确定结构所处损伤等级;
- (7) 将步骤(6)所得结构响应结果进行对数化,再通过线性回归分析得到桥梁延性指标对数与地震动参数对数的线性回归表达式。再采用传统地震易损性计算式计算结构在各损伤状态的超越概率:

$$P_f = \varphi \left( \frac{\ln \left( \frac{\mu_d}{\mu_c} \right)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right) = \varphi \left( \frac{a + b \ln(PGA) - \ln(\mu_c)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right) \quad (5)$$

式中: $\mu_d$ 、 $\mu_c$ 分别为结构需求和结构能力,二者皆服从正态分布。此外,根据 HAZUS99 经验值, $\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}$ 取 0.5。

(8) 综合地震危险性和步骤(7)所得结果,以年预期损失(EAL)为地震风险指标,求出结构在给定地震作用下的地震经济损失。通过上述计算思路,便可以得到桥梁系统的地震易损性曲线,并通过定量的经济指标描述桥梁结构的地震经济风险。

### 3 算例

为了验证所提基于模糊理论的桥梁地震经济风险评估方法的有效性和适用性,本文以兰新二线上一座(40+56+40)m的连续梁桥为算例(图3)。



图3 连续梁桥模型

Fig.3 Continuous beam bridge model

#### 3.1 结构分析

运用 MIDAS/Civil 建立全桥非线性有限元模型。该桥梁体采用 C50 混凝土,为单箱单室变截面、变高度结构,箱梁底板按二次抛物线变化,运用

梁单元模拟;桥墩采用 C30 混凝土,高度分别为 16.5 m、15.5 m、12.5 m 和 13.5 m,35#墩为固定墩,所有桥墩均用弹塑性纤维单元模拟;支座采用球形钢支座,通过竖向刚臂连接支座,刚臂上端与主梁节点刚性主从连接,下端为支座底端节点,与墩顶节点刚性主从连接。为了简化计算,不考虑桩-土相互作用的影响,即墩底固结。

选取桥梁支座位移和桥墩弯曲延性为地震需求参数,通过桥墩关键截面弯矩曲率分析,对桥墩损伤等级进行定量划分。

地震易损性分析是研究该桥地震经济风险基础。选取与桥址处场地条件近似的 20 条实际地震动记录作为地震输入,以峰值加速度为地震动强度参数指标,输入已建立的 MIDAS/Civil 模型并进行增量动力分析(IDA)。大量研究<sup>[16]</sup>表明,对于桥跨结构采用一维地震输入计算结果偏保守且无法完全反映地震的空间特性。但对于非脉冲型地震,竖向地震分量对结构的响应贡献较小,故为简化计算,本文仅考虑纵横向水平向地震作用,横桥向 PGA 幅值:顺桥向 PGA 幅值=1:0.85。

为了对比考虑桥梁系统和仅考虑桥墩构件的地震经济风险,分别对算例桥梁开展基于模糊理论的桥梁系统易损性和桥墩构件地震易损性分析。在进行模糊系统地震易损性分析时,按前文所述和表 1 规定选取各性能指标的隶属度函数。图 4、图 5 分别为支座、桥墩损伤指数的隶属度函数。

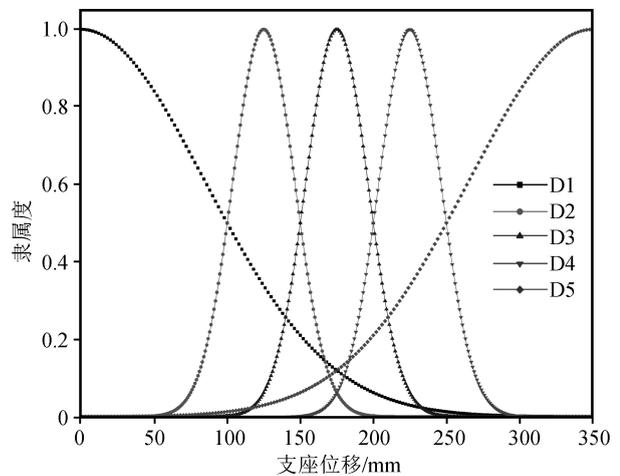


图4 支座损伤隶属度函数

Fig.4 Membership function of bearing damage

按照本文 2.3 节中的分析步骤,采用已选取的实际地震记录对算例桥梁进行增量动力分析,再利用式(5)得出桥墩构件地震易损性曲线和模糊桥梁

系统地震易损性曲线,如图 6 所示。

由图 6 知,在轻微损伤和中等损伤状态下,基于模糊理论的桥梁系统地震易损性普遍大于传统桥墩构件地震易损性。这是由于铁路桥梁上部结构惯性力较大,支座作为主要的桥梁传力构件,在地震动强度较小时较桥墩构件更易发生损伤。在严重损伤和完全破坏状态下,桥墩构件地震易损性一直呈现单调增长的趋势,而模糊桥梁系统地震易损性则呈现出在  $PGA$  为  $0\sim 0.6g$  时单调增长、 $PGA$  为  $0.6\sim 1.0g$  时基本不变的规律。究其原因是在地震动强度较大时,个别桥墩已受到较大损伤,但桥梁整体性仍能通过内力重分配使各墩协同受力得以维持。总体来看,仅以桥墩构件代表全桥地震易损性会明

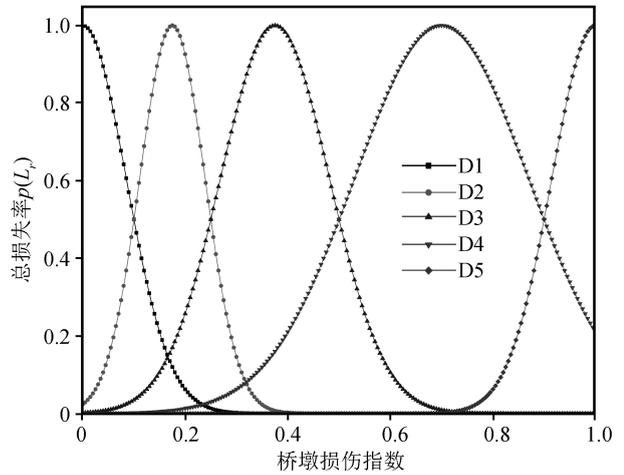


图 5 桥墩损伤隶属度函数

Fig.5 Membership function of pier damage

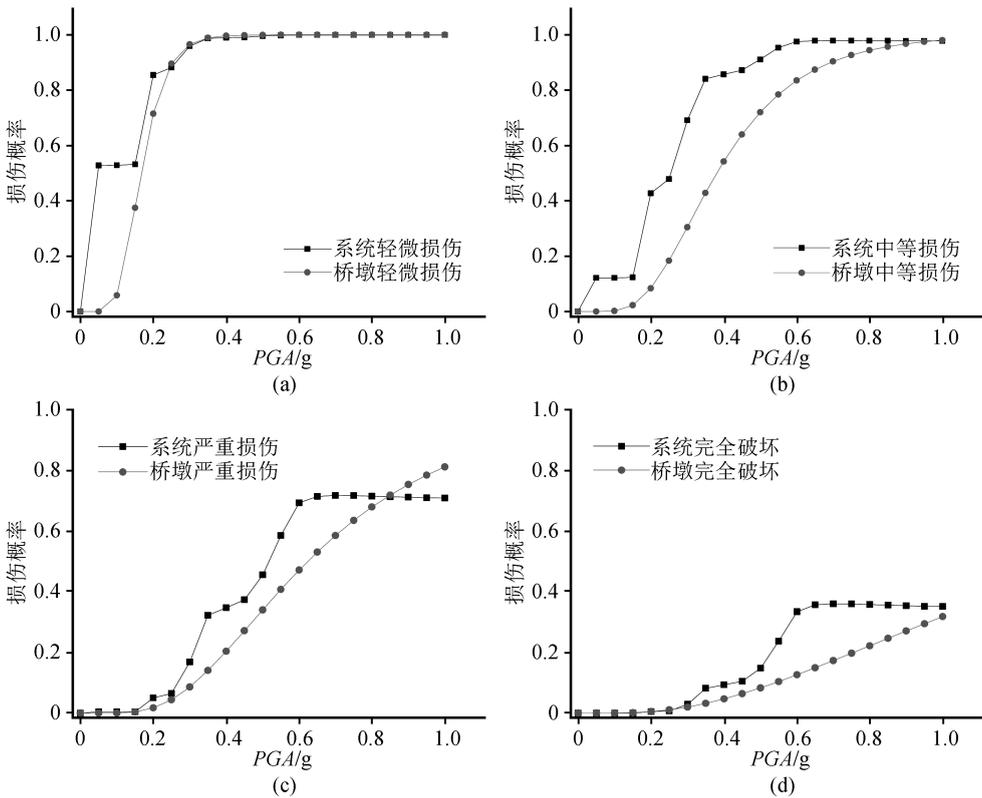


图 6 桥墩构件和模糊桥梁系统地震易损性曲线

Fig.6 Seismic vulnerability curves of pier components and fuzzy bridge system

显低估桥梁整体结构发生各级损伤的超越概率。因此,采用模糊桥梁系统地震易损性分析对桥梁的抗震性能评估更科学合理。

### 3.2 地震经济风险分析

根据连续梁桥的特点和图 6 所示的本桥地震易损性曲线可知,固定墩和支座为本桥最易损构件。为了研究该桥在地震作用下的造成的直接经济损失,在此基于全概率理论的 PEER 地震风险评估框

架体系统展开分析。通过该桥桥址地震危险性、桥梁结构地震易损性和我国灾害直接损失评估规范<sup>[17]</sup>中对结构物各级损伤损失比(即:加固维修费用与重建成本之比)的规定(表 3),并以年预期损失为决策变量,最终得到该桥地震直接经济损失情况。

大量震害资料表明,若连续梁桥发生严重破坏时,结构虽未发生倒塌但修复难度极大,故在此取  $L_r$  为 1.0。根据图 6 中计算结果,将相邻损伤状态

的超越概率做减法便可得到该桥在某一损伤状态下的发生概率  $p(DS_i)$ , 然后将  $p(DS_i)$  与表 2 中各损伤状态损失比对应作乘积即可得到该桥的地震经济损失曲线(图 7)。

表 3 各损伤状态损失比  $L_r$

损伤等级	规范 <sup>[17]</sup> 取值范围	本文取值
基本完好	0.00~0.10	0.00
轻微损伤	0.11~0.20	0.10
中等损伤	0.21~0.40	0.30
严重损伤	0.41~0.70	1.00
完全破坏	0.71~1.00	1.00

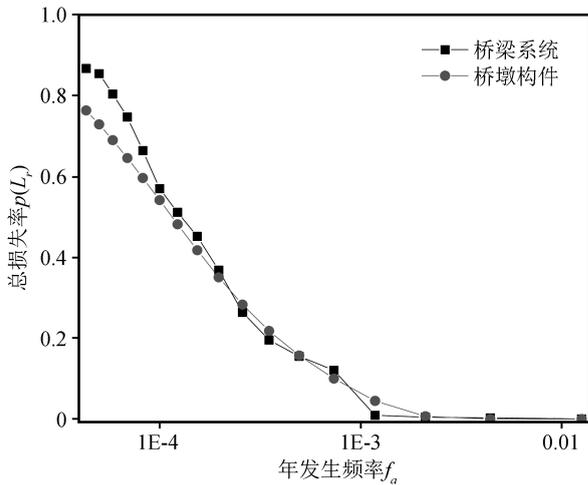


图 7 地震经济损失曲线

Fig.7 Seismic economic loss curve

由图 7 知,桥墩构件和桥梁系统总损失率和地震年发生频率关系曲线规律基本一致。具体表现:当地震年发生频率大于 0.004 时,桥墩构件和桥梁系统总损失率变化均不明显;当地震年发生频率小于 0.004 时,二者皆大幅度增长。由于考虑了支座的损伤,桥梁系统总损失率总体大于桥墩构件经济损失,且二者所得桥梁总损失率差随地震年发生频率的减小而增大。

年预期损失的计算时桥梁地震经济风险的最后一步,其可以离散表达为:

$$EAL = \sum_{l_{r,i}} \left( \frac{l_{r,i} + l_{r,i+1}}{2} \right) (P_a[l_{r,i}] - P_a[l_{r,i+1}]) \quad (6)$$

式中:  $l_{r,i}$  表示第  $i$  破坏状态对应的损失比;  $P_a[l_{r,i}]$  表示损失比大于  $l_r$  的年超越概率。

最终,基于桥墩构件和桥梁系统的年预期损失计算结果见表 4。

由表 4 可知:(1)仅考虑桥墩构件比基于模糊理论的系统总年预期损失小约 14%,因此以桥墩构件

代表全桥的地震经济损失显得较为保守;(2)损失主要集中在年超越概率  $f_a = 0.075 \sim 0.0021$  的中小级别地震,  $EAL_1$  和  $EAL_2$  分别占各自总年预期损失的 63.9% 和 68.8%。当在该地震强度区间内,仅考虑桥墩构件的累计年预期损失( $EAL_1$ )比基于模糊理论的系统累计年预期损失( $EAL_2$ )低达 20%。因此,当进行地震经济损失评价时,仅考虑桥墩构件的地震经济风险造成的误差较大。而基于模糊理论综合考虑桥梁系统的模糊地震经济风险分析方法能更准确计算出连续梁桥在地震作用下的经济损失。

表 4 年预期损失(EAL)计算结果

Table 4 Calculation results of annual expected loss		
$f_a$	桥墩构件 $\Delta EAL_1$ /元	模糊理论 $\Delta EAL_2$ /元
0.075 447	230.07	203.79
0.012 587	55.24	209.64
0.004 416	150.29	167.89
0.002 100	126.96	118.38
0.001 180	77.73	83.09
0.000 737	55.57	60.59
0.000 495	45.63	45.71
0.000 350	37.70	35.30
0.000 258	29.66	27.69
0.000 197	23.23	21.99
0.000 154	19.11	17.63
0.000 123	16.20	14.26
0.000 100	13.51	11.63
合计	880.90	1 017.59

## 4 结论

(1) 基于模糊理论建立了能够反映结构从构件到整体的模糊桥梁系统地震经济风险分析方法。算例表明,对于本文讨论的高铁连续梁桥,基于模糊理论的桥梁系统地震经济风险评估方法较构件地震经济风险评估方法计算所得地震直接经济损失更具工程价值,更能反映工程实际情况。

(2) 该高速铁路连续梁桥地震直接经济损失主要源于年发生频率为 0.075~0.002 1 区间的中小级别地震,约占年预期总损失的 68.8%。

(3) 基于模糊理论的桥梁地震经济风险评估方法能够合理地评估桥梁结构的地震经济风险。以经济指标表达地震风险更有助于利益相关者准确理解桥梁震害风险,利于对震后桥梁的修缮或重建做出科学抉择。

## 参考文献(References)

[1] 张永亮,王云,陈兴冲,等.双薄壁墩连续刚构桥地震反应影响

- 参数分析[J].桥梁建设,2018,48(4):17-21.
- ZHANG Yongliang, WANG Yun, CHEN Xingchong, et al. Analysis of Parameters Having Influence on Seismic Responses of Continuous Rigid-Frame Bridges with Double Thin-Wall Piers[J].Bridge Construction,2018,48(4):17-21.
- [2] 韩小雷,刘颖,侯兆熔,等.基于构件性能评估的 RC 框架结构中震与小震设计对比研究[J].建筑结构,2020,50(10):39-43,27.
- HAN Xiaolei, LIU Ying, HOU Zhaorong, et al. Comparison Research on Designs of RC Frame Structure Based on Component Performance Evaluation under Fortification and Frequent Earthquakes[J].Building Structure,2020,50(10):39-43,27.
- [3] 罗文文,李英民,韩军.基于全概率 PBEE 方法的 RC 框架结构地震损失分析[J].工程力学,2016,33(9):186-194.
- LUO Wenwen, LI Yingmin, HAN Jun. Earthquake Loss Estimation for RC Frames Based on PEER-PBEE Methodology[J].Engineering Mechanics,2016,33(9):186-194.
- [4] 韩建平,褚小嘉.基于易损性分析的 RC 框架-填充墙结构地震直接经济损失计算[J].世界地震工程,2016,32(03):13-20.
- HAN Jianping, CHU Xiaojia. Seismic Direct Economic Loss Analysis of Infilled RC Frame Structure Based on Fragility Analysis[J].World Earthquake Engineering,2016,32(3):13-20.
- [5] ZHANG K, ZHU X, JIANG Cheng. An Application of Seismic Financial Risk Assessment of Three-span Continuous Rigid Frame Bridge[C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering,2008.
- [6] 夏春旭,柳春光.近断层多脉冲地震作用下桥梁墩柱地震风险分析[J].世界桥梁,2018,46(3):56-61.
- XIA Chunxu, LIU Chunguang. Analysis of Seismic Risk of Pier Column Under Action of Near-Fault Multi-pulse Earthquakes[J].World Bridges,2018,46(3):56-61.
- [7] 冯莉,樊燕燕,王力等.基于性能的高速铁路钢管混凝土拱桥地震经济风险分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):573-580.
- FENG Li, FAN Yanyan, WANG Li, et al. Performance based seismic financial risk assessment of a CFST arch bridge over high-speed railway[J].Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(3):573-580.
- [8] MANDER R J B, DHAKAL R P, MASHIKO N, et al. Incremental Dynamic Analysis Applied to Seismic Financial Risk Assessment of Bridges[J].Engineering Structures,2007,29(10):2662-2672.
- [9] 应智超,王中美,刘兵,等.基于 GIS 的瓮安县地质灾害易发性和危险性分区评价[J].贵州大学学报(自然科学版),2020,37(3):119-124.
- YING Zhichao, WANG Zhongmei, LIU Bing, et al. Assessment of the Susceptible Degree and Risk Degree of Geological Hazard in Weng'an County Based on GIS[J].Journal of Guizhou University (Natural Sciences),2020,37(3):119-124.
- [10] COMELL C A, KRAWINKLER H. Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment[J].Peer Center News,2000,20(2):130-139.
- [11] GB 50111-2006, 铁路工程抗震设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2010.
- GB 50111-2006, Code for Seismic Design Railway Engineering[S].Beijing:China Railway Publishing House,2010.
- [12] NIELSON B, DESROCHES R. Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2007,36(6):823-839.
- [13] 徐超,温增平.基于地震动参数的 RC 框架结构易损性分析[J].地震工程学报,2016,38(2):201-211.
- XU Chao, WEN Zeng-ping. Seismic Vulnerability Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures Based on Ground Motion Parameters[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(2):201-211.
- [14] WANG Q, WU Z, LIU S. Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges Considering Multi-dimensional Performance Limit State[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2012,11(2):185-193.
- [15] 李立峰,吴文朋,黄佳梅等.板式橡胶支座地震易损性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(11):1-6.
- LI Lifeng, WU Wenpeng, HUANG Jiamei, et al. Research on the Seismic Vulnerability Analysis of Laminated Rubber Bearing[J].Journal of Hunan University(Natural Sciences),2011,38(11):1-6.
- [16] GB/T 17955-2009, 桥梁球型支座[S].北京:中国标准出版社,2009.
- GB/T 17955-2009, Spherical Bearings for Bridges[S].Beijing:Standards Press of China,2009.
- [17] GB/T 18208.4-2011, 地震现场工作第 4 部分:灾害直接损失评估[S].北京:中国标准出版社,2014.
- Post-earthquake field works-Part 4: Assessment of direct loss[S].Beijing:Standards Press of China,2014.